

REVISTA CARRETERAS

EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS MECANICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE LA MODIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Autores: Ing. Enrique Fensel; Dr. Ing. Gerardo Botasso; Ing. Oscar Raúl Rebollo; Dr. Ing. Luis Delbono

LEMaC Centro de Investigaciones Viales FRLP UTN-CIC PBA

1. Resumen

En el presente trabajo se presentan los cambios producidos en mezclas asfálticas en caliente densas (CAC D-19) definidas sus características por la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) en las que se han mantenido constantes el origen y la granulometría de los agregados que conforman su estructura granular y dejando como variante al tipo de ligante asfáltico a utilizar. Las mismas se han confeccionado con un asfalto convencional y asfaltos modificados con polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU) y polímeros vírgenes o una combinación de ambos y se valora la incidencia del tipo de ligante asfáltico en las propiedades de la mezcla asfáltica elaborada. Se sigue un proceso de diseño a través de la metodología Marshall para el establecimiento de las relaciones volumétricas, para luego pasar a las determinaciones que valoren la adherencia, por medio del Test de Lottman y luego la resistencia al ahuellamiento mediante el ensayo de Wheel Tracking Test. Se considera de esta forma las exigencias vigentes en el pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos del año 2017. Por otro lado, se valora la resistencia a tracción indirecta, al punzonado y se realiza el ensayo de la semiprobeta con el fin de valorar la resistencia a fatiga de todas las mezclas formuladas. De esta forma se ha tratado de realizar una valoración amplia de diferentes tipos de solicitaciones y analizar la respuesta final de las mezclas asfálticas frente a cada tipo de asfalto considerado.

2. Introducción

En el marco del proyecto de investigación y desarrollo "Utilización de diferentes polímeros como modificadores de cementos asfálticos y su incidencia en el desempeño de mezclas asfálticas densas y semidensas" desarrollado en el LEMaC Centro de Investigaciones Viales de la UTN Regional La Plata, Centro asociado a la CIC PBA, en el que se plantea valorar su desempeño mediante ensayos característicos a mezclas asfálticas en las que se mantuvo cuasi constante su dosificación, su curva granulométrica y tipo de agregado, ya que estos procedían de un mismo lote de producción, y a las que únicamente se procedió a variar el ligante asfáltico utilizado con el fin de valorar la evolución de los parámetros mecánicos de las mezclas asfálticas formuladas. Todos los materiales fueron debidamente caracterizados según lo especifica la normativa argentina.

3. Los materiales utilizados

3.1 Los cementos asfálticos

En la Tabla 1 se puede observar los valores obtenidos en los cementos asfálticos con cada tipo de modificación. Se puede destacar que se generan cambios en la penetración, los puntos de ablandamiento y la recuperación elástica por torsión, así como se pone de manifiesto también en los valores hallados luego del envejecimiento en película delgada. Analizando las exigencias

para cada tipo de asfalto modificado, se observa que la adición de polvo de NFU, provoca un asfalto del tipo AC-2, según norma IRAM 6673. Luego se elaboró el asfalto modificado AM-3 según norma IRAM 6596 con aporte de SBS como modificador. A posteriori, se procedió a disminuir la dosis de SBS e ir reemplazándola por polvo de NFU hasta lograr un asfalto del tipo AM-2 como el que se presenta, definiendo más adelante los porcentajes intervinientes para lograr esta clasificación. Bajo estas condiciones se ha seguido el criterio de que cuando un asfalto modificado utiliza polvo de NFU, la clasificación que logre satisfacer se le asigna la letra C. Por lo tanto, se ha designado a ese ligante modificado como AM-2-C.

Tabla 1. Clasificación de los asfaltos utilizados

Ensayo	Método	Unidad	Asfalto Base	Asfalto + NFU	Asfalto + SBS + NFU	Asfalto + SBS
Viscosidad 60 °C	IRAM 6836	dPa s	1889	---	---	---
Índice de Penetración de Pfeiffer	IRAM 6604	---	-0,3	---	---	---
Viscosidad 135 °C	IRAM 6836	MPa s	412	---	---	---
Oliensis	IRAM 6594		negativo	---	---	---
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	IRAM 6576	0,1 mm	---	56	54	70
Punto de Ablandamiento	IRAM 6841	°C	---	55	60	70
Recuperación Elástica Torsional	IRAM 6830	%	---	20	49	76
Viscosidad Rotacional a 170 °C	IRAM 6837	mPa.s	---	512	---	---
Sobre el Residuo de RTFOT IRAM 6839						
Índice de durabilidad	5,3	---	2	---	---	---
Ductilidad a 25 °C, 5 cm / min., (cm)	IRAM 6579	cm	> 100	---	---	---
Penetración (respecto de la penetración original) Retenida	IRAM 6576	%	---	91	70	91
Variación del punto de ablandamiento	IRAM 6841	°C	---		4	2

Pérdida de Masa	IRAM 6839	%	---	0,5	0,6	0,2
-----------------	--------------	---	-----	-----	-----	-----

Ensayo de estabilidad al almacenamiento IRAM 6840

Diferencia de Punto de Ablandamiento	IRAM 6841	°C	---	3	4	1
Diferencia de penetración	IRAM 6576	0,1 mm	---		8	4
Clasificación				CA-20	AC-2	AM2 C AM 3

3.2 Las mezclas asfálticas

Como se había comentado, se elige trabajar con una mezcla del tipo densa que clasifica según las especificaciones 2017 de la DNV como CAC-D19 R [1] con Cementos Asfálticos clasificados como: CA-20; AC-2; AM-2-C y AM-3.

Si bien es esperable que las mezclas asfálticas no tengan un buen comportamiento a las deformaciones permanentes al utilizar un CA-20, la razón de realizarlas con este cemento asfáltico es que el mismo es un muy buen receptor para ser aditivado, por lo que en el contexto general del PID+i es válida su realización y tomar a esta mezcla asfáltica como comparativa para evaluar la acción de las modificaciones realizadas [2,3].

Se diseña una mezcla asfáltica por el método Marshall donde la variable serán los tipos de asfaltos y los áridos del tipo granítico del mismo proveedor y lote de despacho, los que nos asegura una muy buena uniformidad en la conformación de la estructura de los áridos en la mezcla asfáltica. En la Tabla 2 se muestran las curvas límites y la adoptada para la combinación de los agregados que la componen y su gráfica correspondiente como queda graficado en la Figura 1.

Tabla 2. Curva granulométrica de la mezcla utilizada

Abertura	Tamiz N°	Curva Mínima	Curva de la Mezcla	Curva Máxima
(µm)	(In)	(%)	(%)	(%)
25400	1	100	100	100
19100	3/4	83	99,6	100
9520	3/8	60	60,0	75
4760	4	42	42,7	60
2380	8	29	33,6	47
590	30	15	17,3	29
297	50	11	12,9	21
74	200	4	5,3	8

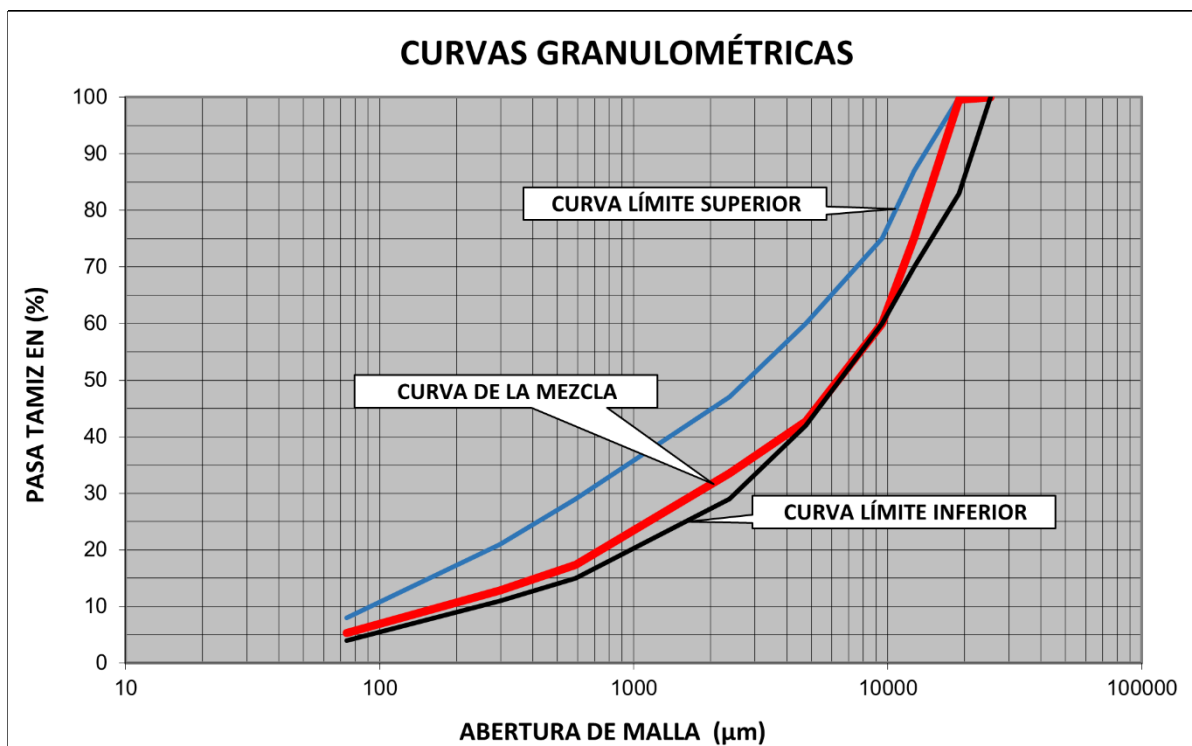


Figura 1. Curva granular y límites de especificación patrón

Las mezclas conformadas por los distintos cementos asfálticos modificados conservan la misma dosificación de áridos que la mezcla base con CA-20, compuesta para este caso con un porcentaje de 4,1% de cemento asfáltico, porcentaje éste determinado en su diseño para cumplir con los límites establecidos en todos los parámetros del PET 2017 de la DNV Argentina, con una temperatura de mezclado de 155°C y de 145°C para la compactación. Luego varía el contenido de ligante teniendo un 4,3% de cemento asfáltico modificado para cada mezcla respectivamente, con una temperatura de mezclado de 175°C y de 165°C para la compactación como se reflejan las dosificaciones para cada tipo de mezcla en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosificaciones de las mezclas

AGREGADOS	DENOMINACIÓN	DOSIFICACIÓN		DOSIFICACIÓN TOTAL
		ÁRIDOS (%)	(%)	
Piedra Partida	06:20	50,0	47,95	47,85
Piedra Partida	12:20	9,0	8,63	8,61
Arena de Trituración	0:6	40,0	38,36	38,28
Filler	CAL	1,0	0,96	0,96
			4,10	4,30
			CA20+8%NFU	
			Asfalto	CA-20 CA20+2% SBS+2,66% NFU
			AM3	

Temperatura (°C)	Compactación	145	155
	Mezclado	155	165

4. Valoraciones

4.1 Wheel Tracking Test (WTT)

El ensayo de Wheel Tracking Test se caracteriza por aplicar una carga dinámica a través de una rueda, la que simula las condiciones de tránsito, sobre una probeta prismática de 300 mm de cada lado y 50 mm de espesor. Se registran las deformaciones verticales sufridas por la mezcla a lo largo de 10.000 ciclos de carga. La temperatura de ensayo fue de 60 °C. La carga de la rueda es de 700 Newton, los cuales se aplican con una frecuencia de movimiento de 26,5 ciclos por minuto. Las características de la rueda están dadas por su diámetro de 200 mm, su ancho de 50 mm, el espesor de la cubierta de 20 mm y la dureza de la cubierta de 80 IRHD.

Para el “Wheel Tracking Test” (Figura 2) se ha utilizado como metodología de ensayo la descrita para dispositivo pequeño como lo describe la Norma UNE-EN 12697-22 – Procedimiento B, en aire.

Para el moldeo de la probeta de ensayo se utilizó el procedimiento establecido en las Normas UNE EN 12697-32 con el Roller Compact visible en la Figura 2 y los parámetros que se miden son:

H5000 = Profundidad de la huella a 5000 ciclos

H10.000 = Profundidad de la huella a 10.000 ciclos

(WTS AIRE) [mm/1000 ciclos de carga] = Pendiente Media de Deformación en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos

(PRD) [%] = Profundidad Media de la Huella

Se denomina valor de ensayo al valor obtenido propiamente en el ensayo y al valor de cálculo a una regresión de la curva que permite establecer la tendencia, descartando valores individuales que se separen de la misma, adoptando este criterio en el LEMaC.



Figura 2. Vista del compactador y equipo de WTT del LEMaC

Tabla 4. Valores resultantes de WTT

			CA 20	CA 20 + 8% NFU	CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	AM3
	Rd _{aire}	mm	3,15	2,28	1,86	1,37
WTT	WTS _{aire}	mm/10 ³	0,142	0,068	0,044	0,030
	PRD _{aire}	%	6,30	4,55	3,71	2,73

En la Figura 3 se grafican los parámetros evaluados en el ensayo de WTT, reflejando las líneas rojas horizontales los máximos permitidos por el PET/2017 de la DNV, Argentina [1].

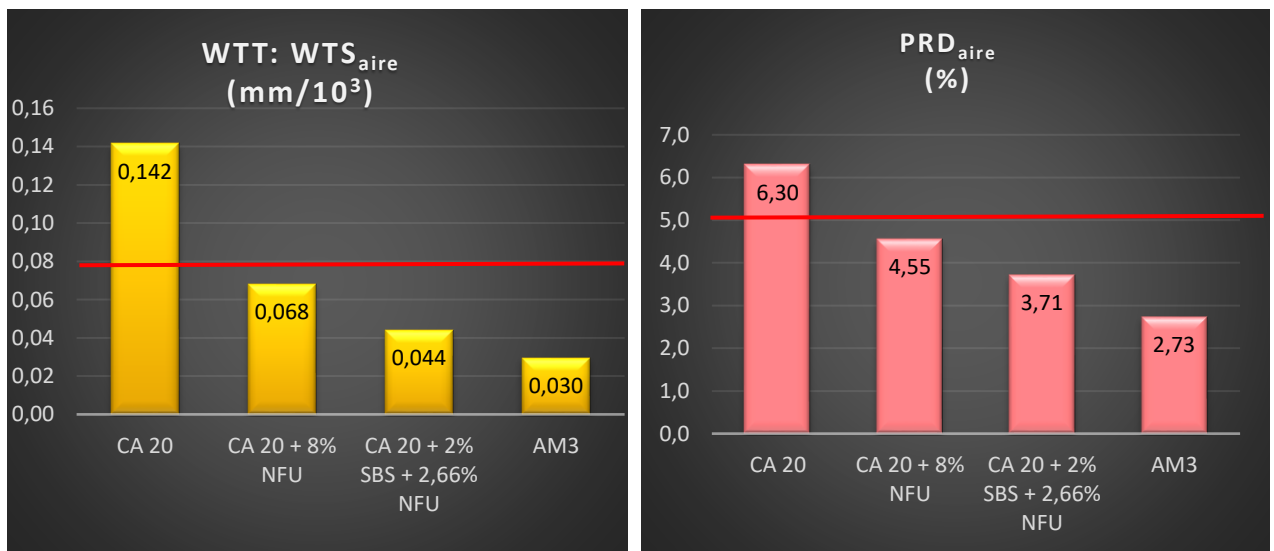


Figura 3. Gráfico de valores de WTT

4.2 Tracción Indirecta

Este ensayo consiste en deformar por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de tal manera que los esfuerzos aplicados a la probeta se ubiquen sobre dos generatrices opuestas a lo largo de un plano diametral vertical.

A una velocidad constante de desplazamiento esta forma de carga desarrolla una tensión de tracción uniforme y perpendicular a la dirección de la carga aplicada a lo largo del plano vertical diametral, que finalmente causa el fallo de la muestra por fractura en ese plano vertical (Figura 4 y 5). El parámetro resultante es la carga de rotura de la probeta ITS (1), determinada en función de la carga aplicada, su espesor y el diámetro.

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (1)$$

Donde ITS es la resistencia a la rotura por tracción indirecta en GPa, P es la carga total aplicada medida en kN, H es la altura de la probeta y D su diámetro, ambas medidas en mm [1].

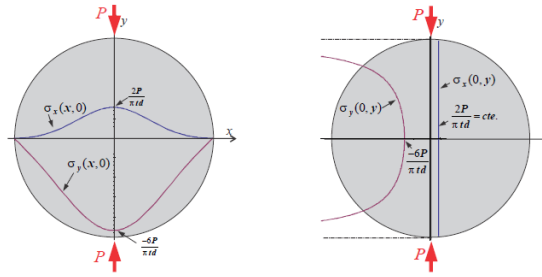


Figura 4. Distribución de tensiones sobre ejes coordenados.



Figura 5. Ensayo de Tracción Indirecta en el LEMaC

En esta instancia vamos a describir la evaluación realizada mediante la metodología de Tracción Indirecta sobre probetas Marshall y núcleos calados obtenidos de las probetas de WTT luego de ser ensayadas. Estos especímenes se calaron en la zona no deformada por el paso de la rueda del WTT, con lo que nos aseguramos una uniformidad en la mezcla asfáltica utilizada para ambos ensayos, dado que el moldeo para ambas series de probetas fue realizado con el mismo pastón de mezcla asfáltica.

Los especímenes para los ensayos de tracción indirecta se han acondicionado a $5^{\circ}\text{C} \pm 2$ durante dos horas [4], y éste se ha llevado a cabo en una prensa Marshall Automática, con adquisición de datos de carga a través de una celda de carga y con LVDT's para la medición de las deformaciones, lo cual es una condición necesaria dado que, realizando este ensayo a esta temperatura, la mezcla se comporta como un material rígido. Otros autores [4] aseguran que a la temperatura de 20°C la mezcla reduce su resistencia a menos de la mitad y su deformación a la rotura se incrementa casi al doble. La susceptibilidad térmica del cemento asfáltico es la causa de este cambio tan notable del comportamiento de la mezcla al elevar la temperatura de ensayo.

Tabla 5. Valores resultantes de TI

			CA 20	CA 20 + 8% NFU	CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	AM3
Tracción Indirecta P°	Carga	kN	41,33	24,93	32,80	32,87
	Deformación	mm	0,71	1,09	1,03	1,49
	Tipo de Rotura*		C	C	C	C
	ITS	GPa	0,00415	0,00253	0,00334	0,00332
		kg/cm ²	42,35	25,75	34,09	33,89
Tracción Indirecta T°	Carga	kN	32,0	21,8	28,3	26,1
	Deformación	mm	0,55	1,13	1,01	1,66
	Tipo de Rotura*		C	C	C	C
	ITS	GPa	0,00399	0,00278	0,00347	0,00334
		kg/cm ²	40,7	28,3	35,4	34,1

*C: Combinación

Se presentan en la Tabla 5 los resultados promedios obtenidos de los ensayos a las 3 (tres) probetas Marshall y a los 4 (cuatro) testigos extraídos (Figura 7) de las probetas de WTT para el ensayo de Tracción Indirecta, tal como indica la normativa asociada a ambos ensayos, y se adicionó en Tracción Indirecta el valor de la Resistencia a Tracción en unidades de kg/cm² por ser ésta, a nuestro criterio, una unidad que podemos magnificar de acuerdo con el costumbrismo de la profesión como lo refleja la Figura 6. Las resistencias a la tracción indirectas expresadas son los valores promedios máximos hallados sin una dispersión de resultados a considerar, estando dentro de los parámetros permitidos por la normativa.

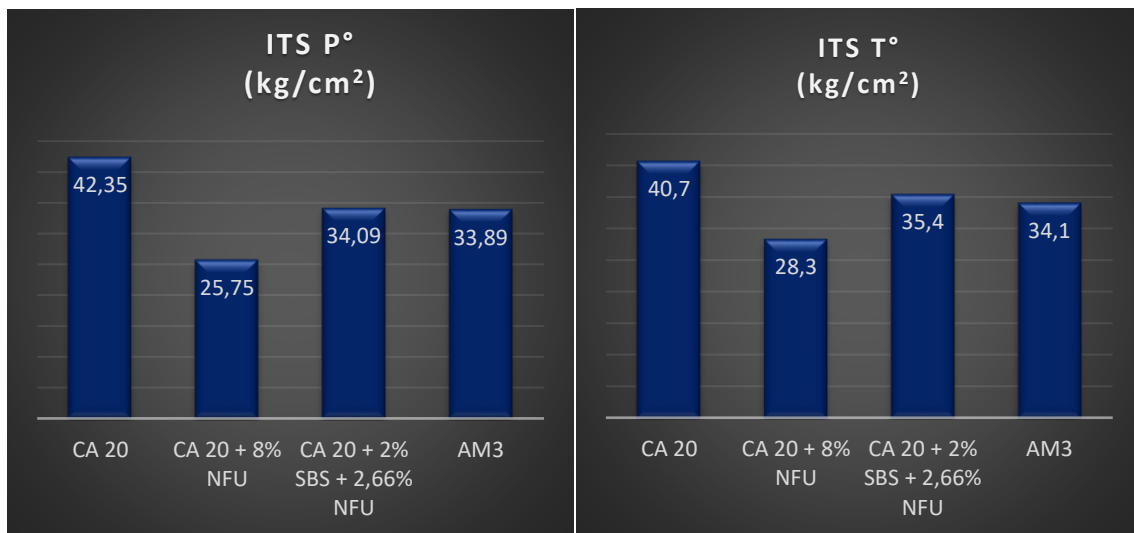


Figura 6. Gráfico de valores de Tracción Indirecta



Figura 7. Extracción de los núcleos sobre las probetas de WTT

Al analizar los resultados obtenidos bajo las condiciones expresadas se encuentra que para la mezcla asfáltica con CA-20 se obtienen los mayores valores de Resistencia a la Tracción respecto a cualquier otro cemento asfáltico de los considerados, lo que provocó la repetición del moldeo y ensayos en dónde se verificaron similares resultados y a raíz de esto el plantearnos analizar los resultados obtenidos en esta situación dado que “a priori” no eran los resultados esperables, en especial dado que en un amplio grupo de ensayos realizados dentro del proyecto se reflejaban los beneficios de las aditivaciones al cemento asfáltico en el desempeño de las distintas mezclas asfálticas.

Esto llevó a una revisión bibliográfica de lo actuado por otros investigadores que ahondaron en el ensayo de Tracción Indirecta analizando distintas variables como las de temperaturas de ensayo y compactación, energía y métodos de compactación, tipos y contenido de cementos asfálticos utilizados, velocidad de carga, etc.

Por ello se decide valorar la energía puesta en juego en el ensayo de Tracción Indirecta evaluando la respuesta de los especímenes, ya no sólo tomando los valores de Resistencia a la tracción con sus deformaciones tomadas como datos aislados, sino valorando ambos en forma conjunta y conformando la expresión de la energía de rotura a tracción indirecta.

Para el proceso de valoración de la energía se toman los datos dados por la prensa Marshall automática se confeccionaron las curvas Carga-Deformación para luego trazar las curvas de tendencia, resultando un polinomio de grado 3 el que más se ajustaba a su desarrollo, teniendo en todos los casos un R^2 mayor a 0,99 lo que nos asegura una gran representatividad de la curva original. Una vez obtenidos los polinomio se realizó la integración de los mismos entre los límites de origen 0-0 y la deformación máxima detectada para hallar el área bajo la curva y que representa el trabajo (energía) medido en Joule ($J = N.m = kN.mm$, medida ésta última que nos da directamente el equipo empleado para el ensayo), y desarrollado por los especímenes ante las carga de compresión diametral y la deformación en ese sentido, lo que nos produce la tracción buscada ante las deformaciones horizontales producidas y reflejados sus valores en la Tabla 6 y gráficamente en la Figura 8.

Tabla 6. Valores resultantes de Energía por TI

	TRACCIÓN INDIRECTA P° Marshall			TRACCIÓN INDIRECTA T°		
	Carga	Deformación	Energía	Carga	Deformación	Energía
	kN	mm	Joule	kN	mm	Joule
CA 20	41,33	0,71	14,68	32,0	0,55	9,09
CA 20 + 8% NFU	24,93	1,09	17,21	21,8	1,13	15,02
CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	32,80	1,03	19,44	26,9	0,91	16,80
AM3	32,87	1,49	28,61	26,1	1,66	22,26

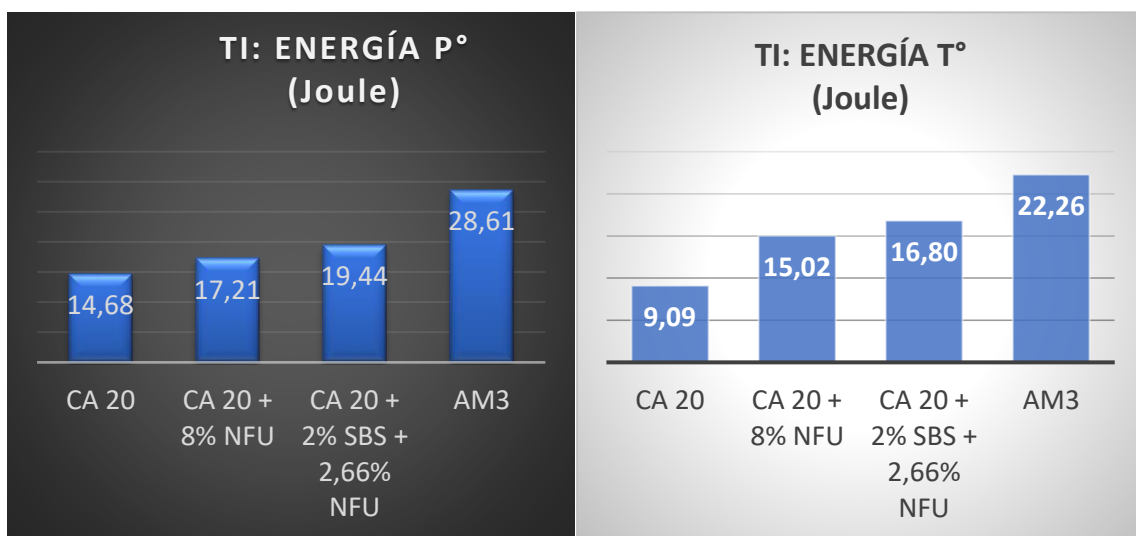


Figura 8. Gráfico de Energías mediante TI

4.3 Valoración mediante punzonado

El ensayo de Resistencia a la Deformación o del Punzonado nos permite calcular la resistencia a la deformación "Sd" de una mezcla asfáltica. El objetivo del ensayo de punzonado es reproducir en laboratorio la carga inducida por el neumático a baja velocidad o cuasi estático, para un estado crítico de temperatura (60°C) y sobre todo considerar que la dirección de la aplicación de la carga sea la misma que la que se produce "in situ" producida por la rueda de un vehículo al circular sobre el pavimento asfáltico. Este ensayo se basa teniendo en cuenta la carga que transmite una rueda al pavimento a través de su sección, considerada circular. Esta forma está dada por el neumático el cual transmite una carga que tiene hombros, o sea no es plana, sino que es de forma redondeada en sus bordes, la cual influye en la distribución de las tensiones de compresión y de corte sobre la capa de rodamiento del pavimento asfáltico. En laboratorio debemos tratar de reproducir esta situación, a fin de representar el mismo estado de tensiones sobre una probeta de mezcla asfáltica que las producidas in situ por el neumático al pavimento asfáltico, para lo cual se diseña un vástago o cabezal de carga de sección proporcional a la del neumático, en la Figura N°9 se muestra el modelo comparativo.

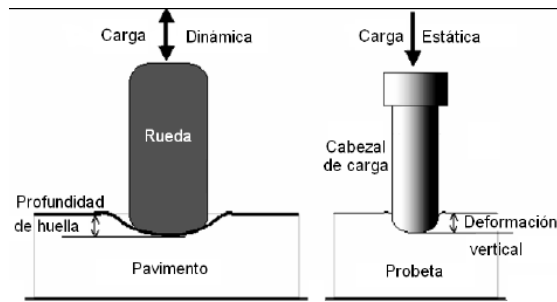


Figura 9. Modelo comparativo entre la rueda y el vástago

Las características del vástago provienen del análisis de sensibilidad de la resistencia al punzonado “Sd” (deformation strength), del cual surge que tanto el diámetro “D” del vástago como el radio de los bordes redondeados del mismo “r”, como se indican en la Figura N°10, son variables importantes. El análisis de sensibilidad estudia la influencia de distintas dimensiones, en Figura N°11 se muestran los modelos de los distintos vástagos propuestos.

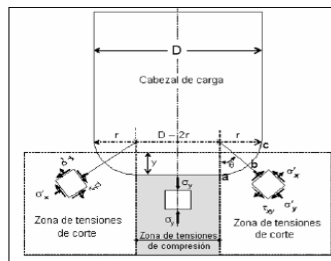


Figura 10. Forma del vástago



Figura 11. Dispositivo de ensayo

Para este trabajo se propone utilizar el vástago y la velocidad de ensayo de acuerdo con lo propuesto por otros investigadores [5]. El diámetro del vástago será $D = 40$ mm y bordes de curvaturas correspondiente a un radio $r = 10$ mm, con una velocidad de ensayo de 50,8 mm/min. El ensayo de Punzonado se realiza con la prensa Marshall automática, la cual nos da la carga máxima y la deformación en forma automática.

Para realizar el ensayo de Punzonado, se acondicionaron las probetas sumergiéndolas en agua a 60°C por un período de 30 minutos. En la figura 12 se muestra el dispositivo para punzonado utilizado en una prensa automática de ensayo Marshall.



Figura 12. Ensayo de punzonado en el LEMaC

En la Tabla N°7 se muestran los valores obtenidos en el ensayo de punzonado de la mezcla fabricada con los distintos asfaltos empleados. En el caso de los valores de Sd informados son el resultado de un valor promedio de tres valores individuales.

Tabla 7. Variación media de la resistencia al punzonado

TIPO DE CEMENTOS ASFÁLTICOS	CA-20	AC-2	AM-2-C	AM-3
RESISTENCIA AL PUNZONADO				
SD DE PROBETAS SD_P	8,1	8,9	9,0	14,6
SD DE TESTIGOS SD_T	4,2	5,2	5,4	6,9

4.4 Valoración de la Tenacidad

Uno de los parámetros más importantes para definir el comportamiento de la mezcla en servicio es la tenacidad que el asfalto proporciona al ligar los agregados, es decir, la energía que se disipa al fracturar la mezcla, entre mayor sea dicha energía mejor será su respuesta a las cargas del tránsito. Y como han demostrado otros investigadores, existe una relación si dicha cantidad de energía se disipa en un ciclo de carga (tracción) o con muchos ciclos durante el tiempo (fatiga). Es decir, existe una relación entre la tenacidad que ofrecen distintos asfaltos y el comportamiento a fatiga de sus correspondientes mezclas asfálticas.

La resistencia a la fatiga es la resistencia a flexión bajo cargas repetidas del tránsito donde en un pavimento se manifiesta por una pérdida de rigidez y posteriormente por una fisuración generalizada. Entre los factores que pueden influir en la resistencia a la fatiga de la mezcla están las características propias del pavimento como el espesor de las capas, donde capas con espesores insuficientes sufrirán una flexión excesiva y se fisurarán más rápidamente, como también la granulometría y el tipo del árido, el contenido de asfalto, grado de compactación, entre otros. Esta resistencia, también llamada tenacidad de la mezcla, es posible analizarla desde el punto de vista de energía disipada, es decir, una mezcla con una mayor capacidad para disipar energía será capaz de prolongar su vida útil resistiendo las cargas del tráfico sin disgregarse o fracturarse en condiciones de servicio.

Para valorar esta resistencia se implementó en el LEMaC el ensayo SCB (Semi Circular Bending), que consiste en un procedimiento rápido y confiable, cuyo objetivo principal es medir la energía de fractura a una temperatura especificada y la tenacidad de la mezcla asfáltica.

Obtenida la probeta de 150 mm de diámetro y 115 mm \pm 2 mm de altura, se determina la densidad, luego se procede a cortar en el centro, obteniendo una probeta de 50 mm \pm 2 mm por un diámetro de 150 mm, descartando las partes externas. Luego, se corta al centro de la probeta, obteniendo 2 partes iguales. En su cara plana, se realiza una entalladura de unos 3 mm en la mitad de la semi probeta, cuyo objetivo es inducir el plano de falla durante el ensayo, Figura 13.

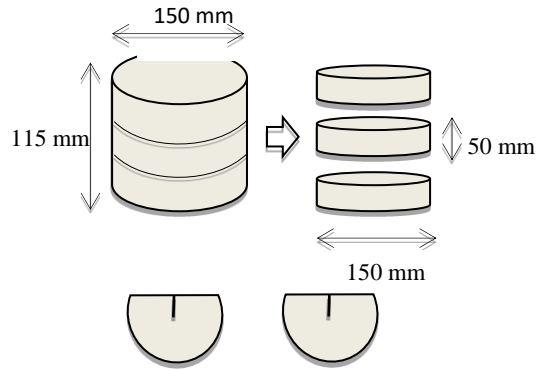


Figura 13. Dimensiones y obtención de la probeta central.

Por último, en una de las caras diametrales, se pinta con cal diluida en agua con el fin de obtener un contraste para la visualización de las fisuras en el momento de ejecución del ensayo hasta la finalización del mismo. Se acondiciona la probeta previamente a 20° C durante 2 hs. Luego se la coloca centrada y simplemente apoyada sobre una estructura diseñada que consiste en 2 rodillos, separados una distancia de 120 mm, es decir, igual al 80% de la longitud del diámetro, Figura 14.

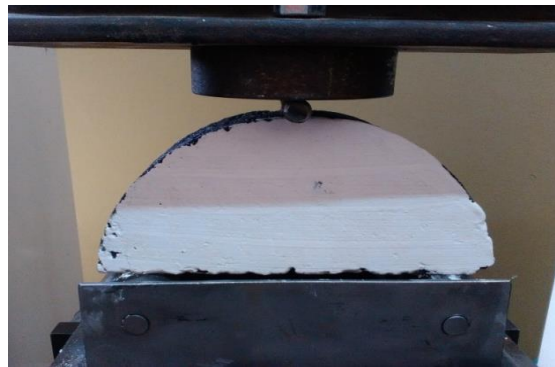


Figura 14. Probeta para ser ensayada.

Se ejecuta el ensayo utilizando el equipo universal de tracción y compresión, aplicando una fuerza constante en el centro de la luz de la semi probeta, a una velocidad de 0,05 mm/min hasta finalizar la ejecución del mismo, Figura 15.



Figura 15. Máquina Universal para la ejecución del ensayo.

Se determina como una prueba válida siempre y cuando la fisura termine en una zona igual al 10% del diámetro de la probeta desde el centro de la franja de carga, Figura 16. En caso de que esto no ocurra, se descarta la probeta ensayando posteriormente otras muestras. Donde las zonas identificadas por los siguientes números nos especifican su consideración: 1. *Ensayo rechazado*; 2. *Área de aprobación* y 3. *Ensayo aprobado*.

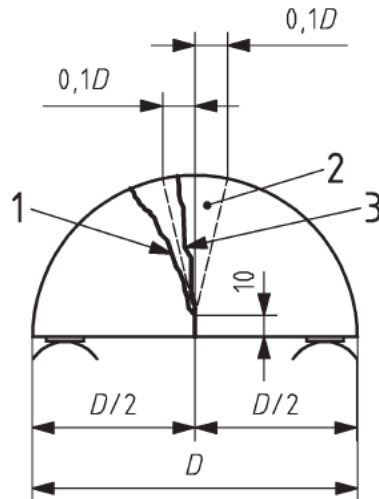


Figura 16. Zona aceptación o rechazo del ensayo.

Fuente: BS EN 12697-44:2010.

Para todos los casos los resultados fueron válidos, por lo que se pudo establecer una curva Carga-Deformación, registrada por el software de la máquina Universal de tracción y compresión, de la cual podemos obtener información como: la Carga Máxima que puede soportar la probeta, la Deformación a la Carga Máxima y la Deformación a Rotura de la misma, pudiendo realizar un estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas ensayadas.

Parámetros a considerar

Extrayendo los resultados del software de ensayo, volcándolos a una planilla excel se procesaron los datos, determinando los siguientes parámetros:

Trabajo de fractura

El trabajo de fractura (W_f) se calcula como el área bajo la curva Carga-Deformación mediante la ecuación 2.

$$W_f = \int_0^{df} F(x) dx \quad (2)$$

dónde:

- W_f : trabajo de fractura
- F: fuerza en función de la deformación
- x: deformación
- df: deformación total

Energía de fractura

La energía de fractura (E_f) se calcula, ecuación 3, dividiendo el trabajo de fractura por el área del ligamento de la probeta antes de la prueba, Figura 17.

$$E_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (3)$$

dónde:

- E_f : Energía de fractura
- W_f : Trabajo de fractura
- A_{lig} : Área del ligamento

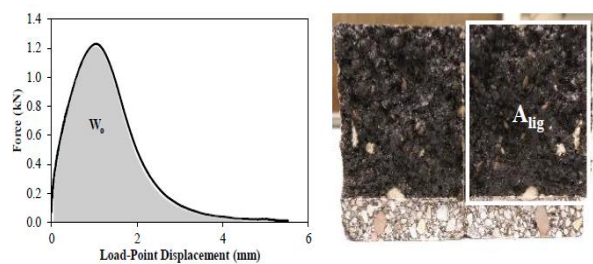


Figura 17. Trabajo de fractura y área del ligamento.
Fuente: Nsengiyumva G. (2015).

Índice de tenacidad

Definido como la energía disipada en el periodo de relajación, multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima, F_{max} hasta que la carga se reduce a la mitad de su valor máximo.

Este índice de tenacidad (I_T) tiene como finalidad, determinar la capacidad que posee la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ya ha alcanzado su resistencia máxima, se determina mediante la ecuación 4.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{A_{lig}} \times (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}}) \quad (4)$$

dónde:

- I_T : Índice de tenacidad ($J/m^2 \cdot mm$)
- W_D : Trabajo total realizado (N-mm)
- $W_{F_{max}}$: Trabajo realizado hasta la carga máxima (N-mm)
- Δ_{mdp} : deformación a $\frac{1}{2} F_{max}$ post pico (mm)
- $\Delta_{F_{max}}$: deformación a F_{max} (mm)
- A_{lig} : Área del ligamento (m^2)

CMOD (crack mouth opening displacement)

Se considera CMOD a la abertura en la superficie de la fisura, medida como la diferencia entre la abertura original y la distancia de apertura final de la semi probeta, Figura 18 y 19.

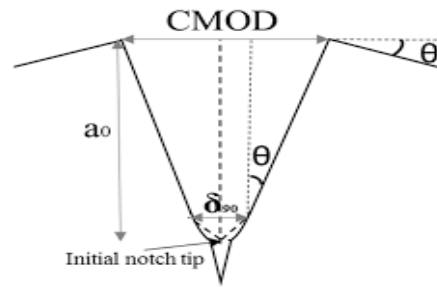


Figura 18. Medición del CMOD.

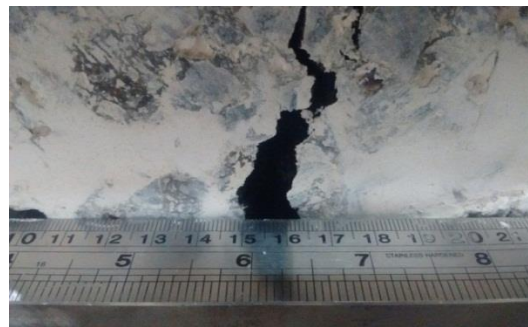


Figura 19. Determinación del CMOD mediante regla graduada.

La Tabla 8 presenta los resultados de los ensayos realizados, de resistencia a fatiga mediante la implementación del ensayo SCB, sobre las diferentes mezclas asfálticas, dosificadas con variación en el cemento asfáltico.

Tabla 8. Valores obtenidos a través del SCB

	F_{max}	Def F_{max}	IT	W_f	E_f	CMOD
	N	mm	J/m ² .mm	N.mm	J/m ²	mm
CA 20	596,9	1,9	115,1	1145	339,25	8,5
CA 20 + 8% NFU	725,7	1,75	420,65	1509,5	447,3	8
CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	1151,75	3,85	229,9	3262,75	966,75	14
AM3	534,85	3,7	217,05	1767,25	523,6	11,5

5. Conclusiones

- El crecimiento de las fuerzas cohesivas, medidas por medio de la energía de rotura en el ensayo de tracción indirecta, es inversamente proporcional a los valores de la pendiente media de ahuellamiento medida con el equipo de WTT.
- Se puede considerar como estrategia de control de calidad, calar núcleos en las probetas del ensayo de ahuellamiento, en este caso WTT, y determinar la energía de rotura en el ensayo de tracción indirecta y para el ensayo de punzonamiento. Estos valores obtenidos pueden ser referenciales para la extracción de núcleos que se realice sobre la capa asfáltica colocada.
- Bajo las condiciones expresadas a lo largo de este trabajo se puede inferir que es deseable para evaluar una mezcla asfáltica tomando las comparativas descriptas el

considerar la energía puesta en juego según la carga de sollicitación y la deformación producida en esa dirección.

- Es posible obtener buenos resultados con cementos asfálticos modificados con NFU dado que, con su incorporación, desde el punto de vista de deformaciones permanentes, hace que una mezcla asfáltica de las características como la planteada, pase a cumplir con las exigencias previstas en las especificaciones técnicas de nuestro país y puede obtenerse una buena evolución en los valores de la energía valorada por medio de los ensayos descriptos. Con ensayos sencillos pueden utilizarse para el control de calidad de la mezcla sabiendo con anterioridad los valores exigibles referenciales. Se estima que si la mezcla cumple con los valores referenciales puede llegar a obviarse el control de ahuellamiento sobre la mezcla colocada, en dicho proceso de control de calidad.
- Desde el punto de vista energético, como respuesta de la mezcla asfáltica ante las sollicitaciones el NFU, es una buena alternativa para el reemplazo de polímeros vírgenes tanto parcial como totalmente en la modificación de los cementos asfálticos.
- Con el concepto de energía absorbida por la mezcla asfáltica tal como ha sido planteado el análisis realizado, se puede tener una valoración de esta en función de la resistencia a la fisuración que puede desarrollar la mezcla en servicio.
- Si bien entendemos que el método de ensayo estático de SCB no representa el comportamiento real a fatiga que sufre una mezcla asfáltica en operación, creemos que proporciona parámetros confiables preliminares de la falla final y la resistencia a la fractura y evidencia los cambios de prestación según los cementos asfálticos utilizados.

6. Referencias bibliográficas

[1] Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Vialidad Nacional. Ministerio de Transporte. Presidencia de la Nación Argentina.

[2] Inclusión de caucho reciclado en mezclas asfálticas. Tesis para Magíster en Ingeniería Ambiental. Resolución 182-04 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación (Argentina). Ing. Hugo Gerardo Botasso (LEMaC).

[3] Empleo del polvo de NFU en Mezclas asfálticas. Dr. Ing. H. Gerardo Botasso (LEMaC). Revista SLT Caucho - Edición N ° 27. Publicado el 10 de octubre de 2018.

[4] Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución. Tesis Doctoral. Autor: Adriana Haydee Martínez.

[5] Comportamiento de Materiales Viales. Diseño y Control de Mezclas Asfálticas Frente a la Deformación Permanente. Tesis Doctoral de Mter. Ing. Silvia M. Angelone. junio 2013